

# 基于层次分析法的天基信息应用效能评估研究

秦国政<sup>1</sup> 马益杭<sup>1</sup> 郝胜勇<sup>1</sup> 付俊明<sup>1</sup> 韩治刚<sup>1</sup>

**摘要** 针对天基信息的整个应用流程,首先从时间链和精度链两个维度构建天基信息应用效能评估指标体系,然后提出基于层次分析法的天基信息应用效能评估模型,最后利用仿真手段对天基信息的应用效能进行验证和评估.研究成果可以为后续天基信息应用效能的分析和评估提供参考.

**关键词** 天基信息应用流程,层次分析法,效能评估模型

**引用格式** 秦国政,马益杭,郝胜勇,付俊明,韩治刚.基于层次分析法的天基信息应用效能评估研究[J].指挥与控制学报,2015,1(3):335-340

**ID** JCC.CN.2015.00335

## AHP-based Effectiveness Evaluation for Space Information Application

QIN Guo-Zheng<sup>1</sup> MA Yi-Hang<sup>1</sup> HAO Sheng-Yong<sup>1</sup> FU Jun-Ming<sup>1</sup> HAN Zhi-Gang<sup>1</sup>

**Abstract** According to the application process of space information, the evaluating index system is constructed from two dimensions of time and precision. Then, the effectiveness evaluating model is proposed by using Analytical Hierarchy Process(AHP). Finally, numerical simulation is demonstrated the effectiveness of the evaluation method. The proposed method can also provide reference for the following researches.

**Key words** space information application process, AHP, Effectiveness evaluating model

**Citation** Qin Guo-Zheng, Ma Yi-Hang, Hao Sheng-Yong, Fu Jun-Ming, Han Zhi-Gang. AHP-based effectiveness evaluation for space information application [J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(3): 335-340

随着我国航天科技的进步,天基资源的数量不断增加,其能力也不断提升,为天基信息在军民领域中的应用奠定了坚实的基础.目前,我国的天基信息已经在军民各个领域得到了广泛应用,形成了许多具有行业特点的卫星应用装备.为了更好地发挥天基信息在各行业中的保障作用,需要对天基信息的实际应用效能进行分析和评估,能够定量描述天基信息的实际保障能力,进而为天基信息应用模式和应用流程的优化提供指导.目前,卫星应用效能的评估主要集中在卫星自身能力方面,例如,卫星的覆盖性、重访时间、分辨率等要素.但是,从卫星的具体观测任务出发,对卫星信息的整个应用流程进行评估的研究还比较少.因此,开展天基信息应用效能评估方法的研究,不论对天基信息应用模式的探索,还是对指导后续天基系统建设和优化,都具有重要的现实意义.

本文将以对地观测卫星为研究对象,从卫星成像需求提出、卫星目标成像、卫星数据接收、数据融

合处理和数据的分发应用流程对卫星信息的应用过程进行详细分解,从卫星信息的时间链和精度链两个维度建立卫星应用效能评估的指标体系,然后,基于层次分析法构建卫星应用效能评估模型进行评估,最后结合具体的应用实例对卫星信息应用效能评估方法进行仿真验证.

## 1 对地观测卫星信息应用流程

对地观测卫星的应用流程如图 1 所示,在接到观测指令时,对地观测卫星在飞临目标上空时,利用其星载传感器设备对用户提出目标进行观测,将探测收集到的目标观测信息暂存到星载存储器中.当卫星进入地面站或中继卫星的覆盖范围内时,通过星地通信链路下载到地面接收站,然后进行观测信息处理.地面数据处理中心通过人工或智能分析判读观测数据,生成用户感兴趣的有价值的信息.卫星观测信息通过网络分发至提出需求的用户.

## 2 卫星应用效能评估指标体系

对地观测卫星的观测信息在各个领域中的应用效能评估主要从信息时间链和精度链两维度进行描述.卫星观测的时间链指标主要是从时间维度对观测信息能够满足用户的要求进行分析和评估,可以从数据时效性、数据更新时间、持续时间 3 个方面

收稿日期 2015-08-25  
Manuscript received August 25, 2015  
国家自然科学基金重大项目(91438117)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China(91438117)  
本文责任编辑 王兆魁  
Recommended by Associate Editor WANG Zhao-Kui  
1. 航天恒星科技有限公司 北京 100086  
1. Space Star Technology Co. Ltd, Beijing 100086, China

进行表示. 卫星观测的精度链指标主要对卫星观测信息的质量能否满足用户的要求进行分析和评估, 可以从目标识别概率、目标定位精度和目标关联能力 3 个方面描述. 从时间链和精度链两个维度对卫星的应用效能进行梳理和评估, 得到如图 2 的评估指标体系.

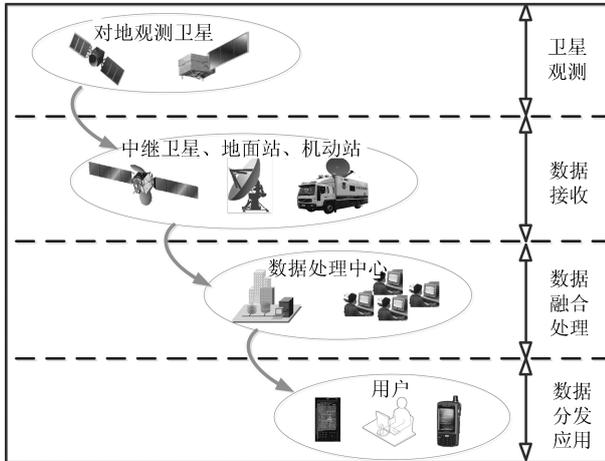


图 1 对地观测卫星信息应用流程

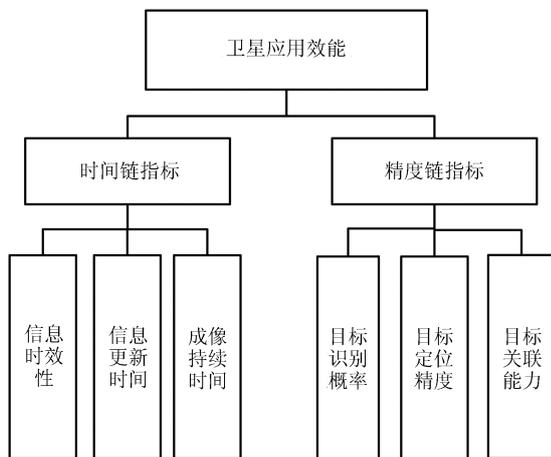


图 2 卫星应用效能评估指标体系

## 2.1 时间链指标

时间链指标主要反映卫星信息应用流程的各个环节, 包括卫星观测、卫星数据接收、卫星数据传输和卫星数据处理各个环节所需要的时间. 下面详细介绍各个要素的模型.

### 1) 目标观测持续时间

目标观测持续时间是指从卫星覆盖到给定目标到完成整个观测过程所需要的时间. 一般来说, 卫星对目标持续观测的时间越长, 越能够反映目标本身的特性. 第  $i$  次目标观测的持续时间  $T_{C,i}$  记为

$$T_{C,i} = t_{oe,i} - t_{os,i}, i = 1, \dots, n \quad (1)$$

其中,  $t_{oe,i}$  表示完成整个观测所需要的时间. 卫星持续时间和观测目标大小、卫星运行速度和星载传感器的视场角有关. 一般来说, 常规非敏捷型卫星的星载传感器视场较窄且卫星运行速度快, 目标观测时间较短. 对于新一代敏捷型卫星, 具备偏航、侧视和俯仰三轴姿态机动能力, 俯仰能力的提升可以使卫星具备较长的目标观测时间.

### 2) 观测信息时效性

信息的时效性指标主要反映卫星信息应用流程的各个环节, 包括卫星对地观测、卫星数据接收、卫星数据传输和卫星数据处理各个环节所需要的时间. 下面详细介绍各个要素的模型.

#### a) 卫星观测时间

卫星观测时间是从卫星接收到观测需求到卫星目标完成观测所需要的时间<sup>[1-2]</sup>. 一般来说, 由于卫星的轨道特性, 卫星接收到观测需求后不能立刻对目标观测, 需要运行到目标区域上空后才能对目标观测. 因此, 卫星观测时间包括卫星覆盖到地面目标的时间和卫星观测的持续时间. 卫星覆盖到目标的时间是指卫星接收到观测目标到卫星能够覆盖到给定目标的时间. 第  $i$  次目标观测的卫星覆盖到目标的时间  $T_{WO,i}$  记为

$$T_{WO,i} = t_{os,i} - t_{os,0} \quad (2)$$

其中,  $t_{os,i}$  表示卫星对目标第  $i$  次观测开始时间,  $t_{os,0}$  表示对观测需求提出时间. 卫星对目标的第  $i$  次观测时间  $T_{O,i}$

$$T_{O,i} = t_{wo,i} + t_{c,i} \quad (3)$$

#### b) 卫星数据接收时间

卫星对目标完成对地观测后, 首先需要对获得信息进行存储, 当卫星经过地面站上空时与地面站建立链路, 然后地面站接收卫星观测数据. 卫星的数据接收时间可分为信息等候下传时间和信息下传时间<sup>[3]</sup>. 信息等候下传时间是指卫星准备下传数据到卫星进入地面站或中继卫星覆盖范围内的时间, 第  $i$  次目标观测的信息等候下传时间  $T_{WT,i}$ .

$$T_{WT,i} = t_{Ts,i} - t_{Ts,0} \quad (4)$$

其中,  $t_{Ts,i}$  表示第  $i$  次目标观测的卫星数据下传开始时间,  $t_{Ts,0}$  表示第  $i$  次目标观测数据准备下传时间. 当地面站和目标同时可见时, 卫星观测数据可以不经过卫星存储直接传回地面站, 在这种工作模式下  $T_{WO,i} = 0$ . 卫星第  $i$  次目标观测数据下传时间

$$T_{d,i} = I_i / V_{rec,i} \quad (5)$$

其中  $V_{rec,i}$  为第  $i$  次目标观测时卫星的数据下传速率

率,  $I_i$  为第  $i$  次目标观测时获取的数据量.

$$I_i = \alpha_i A_{g,i} \quad (6)$$

其中  $A_{g,i}$  为第  $i$  次目标观测时的成像面积,  $\alpha_i$  为第  $i$  次目标观测卫星成像数据量的系数,  $\alpha_i$  和第  $i$  次观测时的卫星本身的性能有关. 因此, 第  $i$  次目标观测的数据接收时间为

$$T_{T,i} = T_{WT,i} + T_{d,i} \quad (7)$$

### c) 数据处理融合时间

数据处理融合时间是卫星数据处理中心接收卫星观测的原始数据、进行卫星图像标准化处理, 生成所需的目标观测信息所需要的时间, 和卫星观测数据量以及相关的数据处理算法有关. 因此, 第  $i$  次目标观测数据的数据融合处理时间  $T_{pro,i}$  记为

$$T_{pro,i} = I_i/V_{pro,i} \quad (8)$$

其中  $V_{pro,i}$  为第  $i$  次目标观测时卫星观测数据处理的速率, 和采用的数据处理算法有关.

### d) 数据分发时间

数据分发时间  $T_{tran,i}$  是卫星数据处理中心将处理完成的数据产品发送至用户终端所需要的时间, 和卫星观测数据量以及地面网络的数据传输速率有关.

$$T_{tran,i} = \beta_i I_i/V_{tran,i} \quad (9)$$

其中  $V_{tran,i}$  是第  $i$  次目标观测数据产品的分发速率,  $\beta_i$  表示第  $i$  次目标观测生成数据产品量和卫星观测数据量比率.

综合上述的描述, 可以得到卫星对目标第  $i$  次观测信息的时效性可以通过下式计算:

$$T_{time,i} = T_{O,i} + T_{T,i} + T_{pro,i} + T_{tran,i}, i = 1, \dots, n \quad (10)$$

### 3) 信息更新时间

信息更新时间主要描述连续两次获得卫星对区域目标成像信息的时间间隔. 一般来说, 信息更新时间越短表明相同时间内对该地域观测的次数越多. 第  $i$  次目标观测的更新时间定义为

$$T_{update,i} = t_{rs,i} - t_{rs,i-1}, i = 2, \dots, n \quad (11)$$

其中  $t_{rs,i}$  表示用户第  $i$  次接收到目标数据产品信息的时间.

## 2.2 精度链指标

精度链指标主要描述卫星观测数据的质量, 主要从卫星目标识别概率、目标指示精度和目标关联能力进行描述.

### 1) 目标识别概率

目标识别概率主要描述对卫星对地观测图像对目标的描述程度, 比如对目标大小、形状、结构和数量等特性的描述. 卫星对目标第  $i$  次对地观测时目标识别的概率可以用以下计算公式<sup>[3]</sup>

$$p'_{d,i} = \begin{cases} 1 & D_i < D_d \\ \exp\left(1 - \left(\frac{D_i}{D_d}\right)^4\right) & D_i \geq D_d \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $D_i$  第  $i$  次观测时卫星的地面分辨率,  $D_d$  为所需要卫星地面分辨率. 一般来说, 太阳高度角是对成像卫星观测质量影响最直接和最重要的因素. 太阳高度角的变化范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ . 第  $i$  次观测时太阳高度角对卫星观测的影响可以简单地用分段线性函数来描述.

$$f_{sun,i} = \begin{cases} 1, & H_i \geq 30^\circ \\ 0.7, & 15^\circ \leq H_i < 30^\circ \\ 0.3, & 5^\circ \leq H_i < 15^\circ \\ 0, & H_i < 5^\circ \end{cases} \quad (13)$$

其中  $H_i$  为第  $i$  次观测时的太阳高度角. 经过太阳高度角影响因子修正, 目标识别概率可以用下式表示:

$$p_{d,i} = f_{d,i} \cdot p'_{d,i}, i = 1, \dots, n \quad (14)$$

### 2) 目标定位精度

在已知卫星星历信息和姿态信息的情况下, 对地观测可以用于目标定位. 根据目标与星下点的相对位置可以确定目标的绝对位置. 本文只考虑卫星姿态误差对目标定位精度的影响. 卫星姿态误差对  $\Delta\varphi$  和  $\Delta\eta$  导致的目标定位误差包括航向误差  $e_a$  和横向误差  $e_c$ , 即<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} e_a = \Delta\varphi D \sin \eta \\ e_c = \Delta\eta D / \sin \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

其中  $\varphi$  为方位角,  $\eta$  为卫星星下点至目标点的张角,  $\varepsilon$  为目标点处测量的卫星与当地地平之间的夹角,  $D$  为卫星至目标的斜距, 分别如图 3 所示.

第  $i$  次目标观测的卫星定位精度  $\sigma_{T,i}$  为

$$\sigma_{T,i} = \sqrt{e_{a,i}^2 + e_{c,i}^2}, i = 1, \dots, n \quad (16)$$

### 3) 目标关联能力

目标关联能力主要描述卫星对目标多次观测时, 当次目标观测与前一次目标观测之间的联系, 通过多次观测更能反映目标自身特性. 目标关联能力与卫星性能以及目标运动属性有关. 目标关联能力可

用下面公式计算<sup>[4]</sup>

$$F_{G,i} = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} V_{tar} (t_{os,i} - t_{oe,i-1})\right), \quad (17)$$

$$i = 2, \dots, n$$

其中  $F_{G,1} = 0$ ,  $\sigma_i$  是与第  $i$  次目标观测的卫星性能有关的参数,  $V_{tar}$  为目标运动速度.

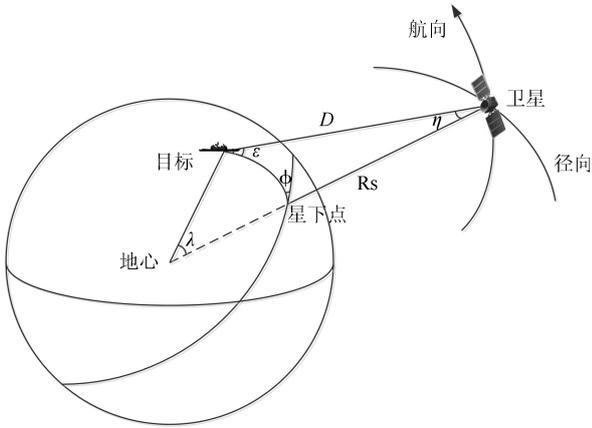


图3 卫星与地面的几何关系

### 2.3 评估指标的归一化处理

为了实现不同类型指标在同一尺度下进行评估, 首先需要对评估指标进行归一化处理. 由 2.1 节和 2.2 节分析可以得出, 观测信息时效性指标、信息更新时间指标、目标定位精度指标是“极小型”指标, 即取值越小越好; 目标观测持续时间是“极大型”指标, 取值越大越好. 选取如图 4 所示归一化函数<sup>[5]</sup>.

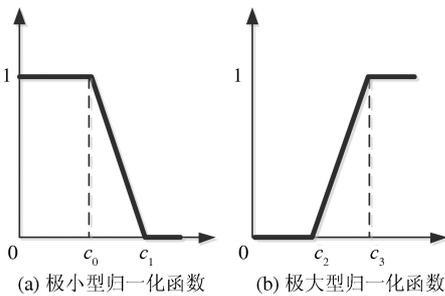


图4 归一化函数

$c_0 \sim c_3$  根据用户的需求合理选择, 图 4(a) 表示当时间  $x \leq c_0$  时, 信息时效性完全满足用户的需求, 当  $x \geq c_1$  时, 信息的时效性已不能满足用户的需求, 当  $c_0 < x < c_1$  时, 随着处理时间增加, 信息时效性对用户的需求满足程度下降. 图 4(b) 与图 4(a) 的含义类似.

### 3 基于层次分析法的卫星应用效能评估模型

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种将定性分析与定量分析相结合的综

合评估方法. 其基本原理是根据不同因素之间的相互关系进行分层聚类组合, 形成一个递阶的、有序的层次结构模型. 然后根据每一层因素的相对重要性确定各个因素相对重要性次序的权值, 最后获得各个层次要素相对与最高层次的权值作为评价和选择的依据<sup>[6-9]</sup>. 应用 AHP 方法进行效能评估的步骤如下<sup>[6]</sup>:

#### 1) 建立层次结构模型

根据第 2 节中的分析结果, 构建卫星应用效能评估的层次结构模型, 如图 5 所示.

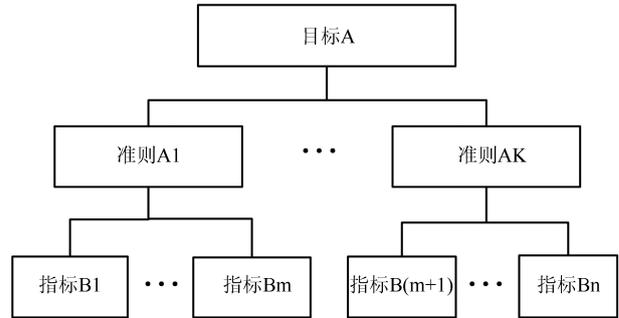


图5 递阶的层次结构模型

#### 2) 构造判断矩阵

在建立层次结构模型, 确定了评估对象中各指标之间的相互关系后, 要进行专家咨询, 确定同一层次各指标之间重要程度的两两比较结果, 然后利用一定的数字标度方法构造判断矩阵.

表1 判断矩阵

$A$	$A_1$	$A_2$	$\dots$	$A_k$
$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$\dots$	$a_{1k}$
$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$\dots$	$a_{2k}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$A_k$	$a_{k1}$	$a_{k2}$	$\dots$	$a_{kk}$

其中,  $a_{ij}$  是相对于  $A$  而言,  $A_i$  对  $A_j$  的相对重要性的数值表示, 通常  $a_{ij}$  取 1~9 及它们的倒数. 判断矩阵具有如下性质

$$a_{ij} > 0; a_{ij} = 1/a_{ji}; a_{ii} = 1(i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

称为互反判断矩阵.

#### 3) 层次单排序及一致性检验

层次单排序是指根据判断矩阵计算本层指标相对于上一层指标的重要性排序, 可以归结为计算判断矩阵的特征向量问题, 对于判断矩阵  $A = (a_{ij})_{k \times k}$ ,  $\lambda_{\max}$  是  $A$  最大特征值,  $w$  是特征值  $\lambda_{\max}$  对应的归一化特征向量,  $w$  的分量  $w_i$  即是对应因素单排序的权值. 为了使分析结果可靠, 需要对判断矩阵进行一致性检验, 步骤如下:

a) 偏离一致性指标  $CI$  是衡量判断矩阵  $A$  偏离一致性矩阵的程度, 其计算公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} \quad (19)$$

b) 相对一致性指标  $CR$  的计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (20)$$

式中,  $CI$  为偏离一致性指标,  $RI$  为平均随机一致性指标.

一般来说, 当  $CR < 0.1$  时, 认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则就不具有满意一致性, 需要进行重新判断或者对判断矩阵进行适当的一致性调整.

### 4 仿真实例

以卫星观测某区域内船只为例, 计算和评估卫星信息的应用效能. 仿真时间选择 2015 年 10 月 1 日 8:00~18:00, 船只初始位置位于  $(11.229^\circ, 143.799^\circ)$ , 航行速度 36 km/h, 假定识别该船只只需要 2 m 分辨率卫星图像. 设定卫星 1 轨道高度 700 km, 地面分辨率 1 m; 卫星 2 轨道高度 900 km, 地面分辨率 3 m. 卫星 1 和卫星 2 姿态误差  $\Delta\varphi = 0.03^\circ$   $\Delta\eta = 0.01^\circ$ . 卫星数据接收站位于  $(39.929^\circ, 116.388^\circ)$ . 利用 STK 软件进行仿真计算可以得到如表 2 所示结果.

表 2 仿真结果

观测序号	第 1 次 (卫星 1)	第 2 次 (卫星 2)
观测开始时间	08:31:13	09:25:47
观测结束时间	08:34:51	09:25:52
观测持续时间 (sec)	218.365	4.88
数传开始时间	09:58:20	10:53:59
太阳高度角 (deg)	60.550	71.152
斜距 D(km)	706.742	1 014.690
目标点仰角 $\varepsilon$ (deg)	82.115	60.548
卫星张角 $\eta$ (deg)	7.052	25.507

利用表 2 中的仿真结果, 结合第 2 节中给出的卫星应用效能指标体系的计算方法, 可以得到如表 3 所示的卫星应用效能指标.

表 3 卫星应用效能指标

观测序号	第 1 次 (卫星 1)	第 2 次 (卫星 2)
需求提出时间	08:00	08:00
持续时间 (min)	3.64	0.08
信息时效性 (min)	124.33	175.98
信息更新时间 (min)	-	51.65
目标识别概率	1	0.017 2
目标定位精度 (km)	0.132 5	0.306 1
目标关联能力 $\sigma=10$	-	0.856 5

利用图 4 给出的归一化函数, 对表 3 中的卫星应用效能指标进行归一化处理, 可以得到如表 4 所示的归一化卫星应用效能指标.

表 4 归一化卫星应用效能指标

观测序号	第 1 次	第 2 次	归一化参数取值
持续时间 (min)	1	0.16	$c_2=0, c_3=0.5$
信息时效性 (min)	0.371 1	0.031 1	$c_0=30, c_1=180$
信息更新时间 (min)	0	0.139 2	$c_0=0, c_1=60$
目标识别概率	1	0.017 2	-
目标定位精度 (km)	0.735 0	0.387 8	$c_0=0, c_1=5$
目标关联能力	0	0.856 5	-

针对图 2 卫星应用效能评估指标体系, 利用层次分析法, 根据专家咨询意见构造判断矩阵. 本文中构造目标判断矩阵和准则判断矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 2 \\ 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

计算上述矩阵的层次单排序和进行一致性检验得到:

$$w = \begin{bmatrix} 0.894 4 \\ 0.447 2 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 2, CR = 0;$$

$$w_1 = \begin{bmatrix} 0.872 9 \\ 0.436 4 \\ 0.218 2 \end{bmatrix}, \lambda_{\max,1} = 3, CR = 0;$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.164 0 \\ 0.871 1 \\ 0.462 9 \end{bmatrix}, \lambda_{\max,2} = 3.0037, CR = 0.0032.$$

因此, 上述判断矩阵具有满意的一致性, 假设在某一段时间内得到归一化的时效性指标和数据质量指标:

$$T_{m,1} = [T_{time,1}, T_{update,1}, T_{c,1}] = [0.371, 0, 1];$$

$$F_{m,1} = [p_{d,1}, \sigma_{T,1}, F_{G,1}] = [1, 0.735, 0];$$

$$T_{m,2} = [T_{time,2}, T_{update,2}, T_{c,2}] = [0.031, 0.139, 0.16];$$

$$F_{m,2} = [p_{d,2}, \sigma_{T,2}, F_{G,2}] = [0.017 2, 0.387 8, 0.856 5].$$

可以得到该时间段内, 卫星的应用效能为

$$T_{total,1} = 0.894 4 T_{m,1} \times w_1 + 0.447 2 F_{m,1} \times w_2$$

$$= 0.844 5$$

$$T_{total,2} = 0.894 4 T_{m,2} \times w_1 + 0.447 2 F_{m,2} \times w_2$$

$$= 0.439 5$$

由于  $T_{total,1} > T_{total,2}$ , 所以第 1 次目标观测效能优于第 2 次目标观测效能.

## 5 结论

本文以典型行业中对天基信息的应用需求为基础, 从卫星观测需求提出、卫星观测、数据接收、数据融合处理、数据分发应用等卫星信息应用环节出发, 对卫星成像信息的应用流程进行详细分析, 构建卫星信息应用效能评估指标体系, 基于层次分析法构建卫星信息应用的效能评估模型, 对卫星信息的应用效能进行仿真评估. 仿真结果验证了该方法的有效性. 本文的研究成果可以为后续卫星信息应用模式和卫星系统的优化提供依据.

## References

- 1 黄小钰, 李智. 空间信息系统在弹道导弹防御中的效能评估框架 [J]. 电光与控制, 2011, 18(11), 44-48.
  - 2 郑义成. 卫星探测舰船目标效能评估技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
  - 3 曹裕华, 冯书兴, 管清波. 航天器军事应用建模与仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
  - 4 唐宏美. 基于电子与光学传感器的目标关联技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
  - 5 冯书兴. 卫星系统综合效能分析研究 [J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 740-743.
  - 6 项磊, 杨新, 张扬, 等. 基于层次分析法与模糊理论的卫星效能评估 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 55-61.
  - 7 刘伟波. 基于层次分析法的某型舰船主动力装置综合评估研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
  - 8 安雪滢, 赵勇, 杨乐平, 等. 基于模糊理论的卫星系统效能评估仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2334-2337.
  - 9 邢昌凤, 李敏勇, 吴玲. 舰载武器系统效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 秦国政** (1986-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为卫星建模分析、卫星应用效能评估.  
E-mail: qgzh1986@163.com
- 马益杭** (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星应用仿真、天基信息应用流程.
- 郝胜勇** (1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星应用仿真、天基信息应用流程.
- 付俊明** (1981-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星应用模式、天基信息应用流程、体系仿真.
- 韩治刚** (1973-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为卫星应用模式、体系架构、体系仿真.